



TITLE:

# 核変換処理を目指す高強度負ミュオン生成法の研究( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

沖田, 英史

---

CITATION:

沖田, 英史. 核変換処理を目指す高強度負ミュオン生成法の研究. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-05-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22657>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020-06-01に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	沖田 英史
論文題目	核変換処理を目指す高強度負ミュオン生成法の研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は使用済み核燃料に含まれる長寿命核分裂生成物の処理方法の一つである負ミュオン核変換に関するもので、これに用いる高強度負ミュオン生成のために提案された MERIT (Multiplex Energy Recovery Internal Target) 方式の可能性について理論的ならびに実験的に研究を行い、得られた結果をまとめたものである。本論文は7つの章からなる。</p> <p>第1章は序論として、この研究の背景ならびに目的等について述べている。我が国における放射性廃棄物およびその処理方法に関する現状と問題点を述べ、その解決策として提案された負ミュオン核変換の原理を説明し、長寿命核分裂生成物の実際の処理には毎秒 <math>10^{16}</math> 個の負ミュオンの生成が必要なことを述べている。さらに従来の手法を用いた高強度負ミュオン生成における課題を提示し、その解決法として提案された MERIT 方式について述べている。また、この方式固有の原理である「固定周波数加速」と「内部標的を用いた貯蔵」の実験的検証が MERIT 方式実用化のために必要不可欠であるとし、この2点を検証することが本研究の目的であると記述している。</p> <p>第2章では高強度負ミュオン生成法として提案されている MERIT 方式およびその原型となる ERIT (Energy Recovery Internal Target) 方式について記述している。これらの方式を用いて高効率なパイオン（パイオンはミュオンに崩壊）等の二次粒子生成を実現するには、二次粒子生成反応以外の要因による貯蔵中のビームの損失を減らすこと、すなわち高い貯蔵性能をもつ必要があることを述べている。MERIT 方式に適した加速器の一つに FFA(Fixed Field Alternating-gradient)加速器があり、この加速器は原理的に大きなエネルギーアクセプタンスと横方向のアクセプタンスを有していること、これを用いることで MERIT 方式に必要な高い貯蔵性能を確保することができ、高効率で高強度な二次粒子生成が可能となることを述べている。さらに、実際の核変換処理に必要な高強度ミュオン生成のための 600 MeV/u 重陽子 ERIT リングおよび 800 MeV 陽子 MERIT リングの基本設計について述べ、実用機の基本諸元を明らかにしている。</p> <p>第3章では本研究の中心テーマであり MERIT 方式の根幹となる「固定周波数加速」と「内部標的を用いた貯蔵」の実験的検証のための原理実証機の設計について述べている。原理実証実験にあたり、京都大学複合原子力科学研究所に設置された既存の FFA-ERIT リングの磁極を改造し、原理実証機として用いる。改造後の磁極による磁場が、固定周波数加速を可能とする準等時性の条件を満たす集束系を実現するように磁極設計を行い、3次元磁場計算によりこの条件を満たす磁場分布が得られていることを確認している。また、内部標的を用いた貯蔵を実現するためにターゲットの材質・厚み・大きさ・リング内への設置に関する設計について述べている。内部標的でのエネルギー損失および衝突によるビームエミッタンス増大、さらに高周波加速空洞でのエネルギー回復等の効果を考慮し、先に3次元磁場計算によって得られた磁場分布を用いてビームシミュレーションを実施し、設計した原理実証機と内部標的を用いて固定周波数加速と内部標的を用いた貯蔵の実験的検証が可能であることを明らかにしている。なお、ビームシミュレーションには本研究で独自に開発したビームシミュレーションコードを用いており、このコードは物質中における粒子の振る舞いをシミュレートするためのコード G4Beamline を基盤として書かれている。</p> <p>第4章では原理実証実験に用いたイオン源・線形加速器・ビーム輸送系・原理実証機から構成される加速器システム、ならびにビーム調整機器・ビームモニターについて記述している。さらに短バンチビームの生成手法とその評価・入射ビームエネルギーの測定とその調整方法・輸送系から原理実証機へのビームの入射位置および角度調整・磁場擾乱によって引き起こされる軌道の歪みに対する軌道補正・ベータトロンチューンの測定等、原理実証実験に必要な加速器の基本運転パラメータの確立について記述している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	沖田 英史
<p>第5章では第4章で得られたパラメータを用いて行った原理実証実験について、実験結果ならびに考察を述べている。考察ではビームの周回数に対する生き残りの割合が、内部標的のある場合とない場合において、実験結果とビームシミュレーションで良い一致を示していることを記述している。また、縦方向でのビームの位相分布の時間変化の解析結果からも、ビーム損失のタイミング・シンクロトロン振動周期・シンクロトロン振動振幅の減衰等が、内部標的のある場合とない場合において、実験結果とビームシミュレーションがよく一致していることを示している。以上の事実より原理実証機において、MERIT方式の原理である固定周波数加速と内部標的を用いた貯蔵の両方が実証されたことを述べている。</p> <p>第6章では本論文の要約が示され、最後に第7章では本論文の結論として、本研究で実施した原理実証実験の解析と考察から、MERIT方式の原理である固定周波数加速と内部標的を用いた貯蔵の有用性が実証されたことを述べている。さらに本研究の成果を受けて、今後はMERIT方式を用いた負ミュオン生成リングとして検討されている800 MeV陽子MERITリングや重陽子ERITリングの開発へと研究の発展が期待されると結んでいる。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は使用済み核燃料に含まれる長寿命核分裂生成物の処理方法の一つである負ミュオン核変換に関するもので、これに用いる高強度負ミュオン生成のために提案された MERIT 方式の可能性について理論的ならびに実験的に研究を行い、その根幹となる「固定周波数加速」と「内部標的を用いた貯蔵」の原理を実験的に検証したものである。

本研究で得られた主な成果は次の通りである。

1. 高強度負ミュオン生成法に関して、従来の厚い標的を用いる手法の課題を整理し、MERIT 方式のように常に高いエネルギーで何度も薄い標的に照射し負ミュオンを生成させる手法の有効性を、シミュレーションコード G4Beamline を用いた詳細な計算により明確にした。
2. MERIT 方式に必要な不可欠である固定周波数加速と内部標的による貯蔵を可能とする FFA 加速器と内部標的の設計を 3 次元磁場計算、軌道計算等を用いて実施し、その設計とリング開発に世界で初めて成功した。
3. 本研究で開発した G4Beamline を基盤としたビームシミュレーションコードを用いて MERIT 方式に関する詳細な評価が可能であることが明らかとなり、今後の負ミュオン生成 MERIT リングの実現に向けた詳細な検討が可能となった。
4. 世界で初の MERIT 原理実証実験において、固定周波数加速と内部標的を用いた貯蔵の有効性を検証する手法を確立し、必要な実験パラメータを決定した。
5. 高強度負ミュオン生成法である MERIT 方式の原理を実験的に検証し、その原理である固定周波数加速と内部標的を用いた貯蔵の有用性を世界で初めて明らかにした。

以上、本研究で得られたビーム物理学およびビーム工学分野における知見は、今後の MERIT 方式を用いた高効率かつ高強度の 2 次粒子生成のための加速器の研究開発を進める上で極めて有用なものである。また、本研究により実用化への可能性が拓けた MERIT 方式でのミュオン生成法は、使用済み燃料中の長寿命核分裂生成物の核変換処理の解決策としての負ミュオン核変換のみならず、ミュオンを用いた様々な研究分野に広く貢献できるものと期待されており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 2 年 4 月 2 日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。